

Araştırma Makalesi - Research Article

Kalça Protezlerinde Oluşan Aşınmanın Femur Kas-İskelet Sistemi Tabanlı Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi

Erkan BAHÇE^{1*}, Derya KARAMAN², Mehmet Sami GÜLER³

Geliş / Received: 27/08/2019

Revize / Revised: 18/11/2019

Kabul / Accepted: 17/12/2019

ÖZ

Kalça protez kullanımı artan ortalama yaşam süresine ve nüfusa bağlı olarak gün geçtikçe artmaktadır. Üstün klinik başarıya rağmen aşınmaya bağlı olarak kalça protezlerinin gevşemesi ve ağrılı süreçlerin tekrar başlaması beklenen bir durum haline gelmiştir. Bunların engellenebilmesi için yapılan çalışmalar in vitro ortamlarda test edilerek sağlık alanında gelişmeler kaydetmektedir. Bu makalede de kalça protezlerinde ki in vitro test koşullarını daha kısa sürelerde sağlamak amacıyla kas-iskelet simülasyonu tanımlanan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analizler gerçekleştirildi. Bunun için erişkin hastaya ait femur kemiği, bu kemiğe uygun kalça protezi ve 172 adet kas birim yük değeri kullanıldı. Yapılan analizler sonucunda kas sistemlerinin uygulanması aşınma derinliğini ve gerilmeleri azalttığı belirlendi.

Anahtar Kelimeler- *Femoral Stem, Aşınma, Ti6Al4V, Sonlu Elemanlar Yöntemi*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: erkan.bahce@inonu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5389-5571>)

İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Malatya, TÜRKİYE,

²İletişim: deryakaraman@ktu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5371-9332>)

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Trabzon, TÜRKİYE, 61080

³İletişim: mehmetamiguler@odu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-0414-7707>)

Ordu Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ordu, TÜRKİYE, 52200

Investigation of Wear in Hip Prosthesis by Finite Element Analysis Based on Femur Musculoskeletal System

ABSTRACT

The use of hip prostheses increases with increasing average life expectancy and population. In spite of the superior clinical success, loosening of the hip prostheses and the resumption of painful processes due to abrasion have become expected. In order to prevent this, the studies carried out in vitro have been tested in the field of health. In this article, in order to provide the in vitro test conditions in hip prostheses in shorter times, analyzes were performed by Finite Element Method which defined musculoskeletal simulation. For this purpose, femoral bone of adult patient, hip prosthesis and 172 muscle unit load value were used. As a result of the analysis, it was determined that the application of muscle systems decreased the depth of wear and tensions.

Keywords- *Femoral Stem, Wear, Ti6Al4V, Finite Element Method*

I. GİRİŞ

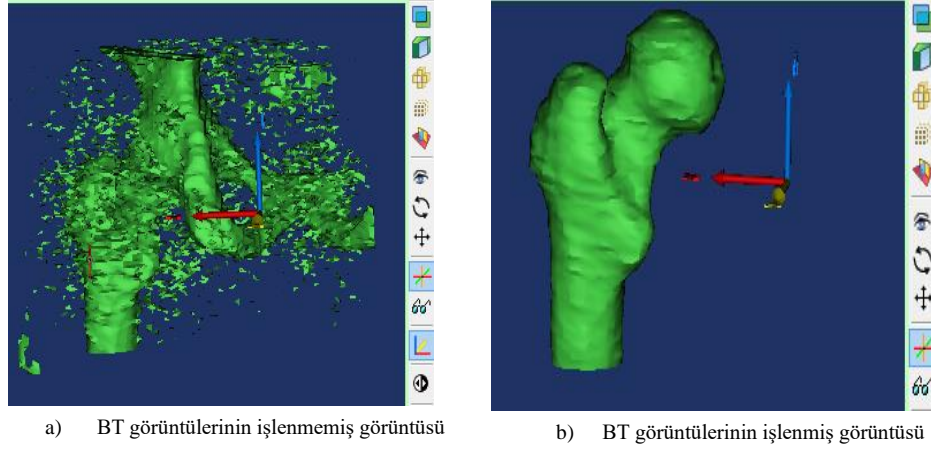
Kalça protez operasyonlarında osteorite uğramış kalça eklemine temizlenerek yerine yapay kalça eklemine yerleştirilmesi ile hastanın yaşamına aynı şekilde devam etmesi hedeflenmektedir. Kalça protezlerindeki klinik başarıya rağmen hastaların revizyon operasyonlarına ihtiyaç duymadan kalça protezlerinin kullanımı oldukça düşüktür. Bunun nedeni olarak genellikle hastanın kemik dokusundaki bozulmalar, protez malzemelerinin insan vücuduna uyumu ve yük altında farklı davranışlar göstermesi ifade edilmektedir [1,2]. Özellikle protez tasarımlarından ve cerrahi operasyonun uygulama yönteminden kaynaklı farklı yüklenme durumlarının oluşması protezlerin kullanım ömürlerini azaltmaktadır [3].

Femur stemlerinde yüklenme, hasta bacak dengesini ve yumuşak doku dengelemesinin ayarlanmasında etkili olmakla beraber oluşturduğu yüksek gerilmeler yüzeyde çatlaklara veya korozyona yol açmaktadır [4,5]. Bununla birlikte femur kemiği içine yerleştirilen metalik sap, oluşabilecek fazla mekanik gerilmeler karşısında kemik dokusunun erimesine yol açabilecek doğal kuvvet/gerilme dağılımının değişmesine ve protezin gevşemesine neden olmaktadır. İstenmeyen durumların ortadan kaldırılması için literatürde stem bileşenlerinin tasarım ve malzeme özelliklerinin incelenmesi için birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğu, güvenilirliği ispatlanmış ve uzun vadeli sonuçların kısa sürelerde elde edilmesine yardımcı olan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir [6]. Colic ve ark. [7] 2,5 – 6,3 kN aralığında değişken yükler altında parsiyel kalça protezlerinde gerilme alanı değişikliğinin implant stabilitesinde sorunlara yol açtığını sonlu elemanlar analizi ile ifade etmişlerdir. Arabnejad ve ark. [8] tamamen gözenekli bir yapıya sahip femoral stem bileşeninin düz femoral stem ile karşılaştırmasını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemişlerdir. Gerilmelerin ve kemik kaybının azaltılması için gözenekli yapıların kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir. Brand ve ark. [9] kalça protez femoral stem bileşenlerinin sabitlemesinde farklı bir yöntem olan vidaların, stabiliteye etkisinin incelenmesi amacıyla ANSYS ile yapılan analizlerde maksimum gerilmelerin stem boyun kısmında yoğunlaştığını tespit etmişlerdir. Kumar ve George [10] çimentosuz kalça protezlerinin stabilitesini sağlamak ve gerilme dağılımlarını incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi ile yaptıkları çalışmada sayısal veriler oluşturmuşlardır. Ashkanfar ve ark. [11] femoral stem bileşeninin konik kısmındaki aşınmayı incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Pürüzsüz konik ve muylulu yüzeylerin stemlerde daha iyi sabitleme sağlayacağını ve hacimsel aşınma oranlarını azaltacağı sonucuna vardıklarını belirtmişlerdir. Westerman ve ark. [12] femoral stemlerinin yürüme veya tökezleme durumundaki yorulma dayanım özellikleri için in vitro testler gerçekleştirmiş ve elde edilen verileri sonlu elemanlar analiz verileri ile karşılaştırmıştır.

Yapılan çalışmaların çoğunda stabilite ve yük dağılımının incelenmesi ve bunların protez gevşemesine olan etkileri belirtilmiştir. Nitekim analizlerdeki tahmini sonuçların gerçek veriler ile desteklendiği ifade edilmektedir [13,14]. Bunların yanında protezlerdeki malzeme aşınmaları, stemin gevşemesine neden olmaktadır. Ani darbeli hareketlerde veya müsaade edilebilir hareket açı değerlerinin aşılması durumunda sürtünmeye bağlı olarak aşınmalar gerçekleşebilmektedir. Aşınmalar yüzey özelliğinin bozulmasına, vücut ortamına aşınma partiküllerinin salınmasına, dengenin bozulmasına ve metal iyon salınımının gerçekleşmesine neden olmaktadır [15]. Bunların incelenmesi ve engellenmesi için kalça protez bileşenlerinin eklem konumuna göre değerlendirilmesi günümüzde oldukça dikkat çekmektedir. Bu çalışmada da femoral stem bileşeninin aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla kalça eklemine kas ve tendonlarının etkisi göz önünde bulundurularak sonlu elemanlar analizlerinin yapılması amaçlanmaktadır.

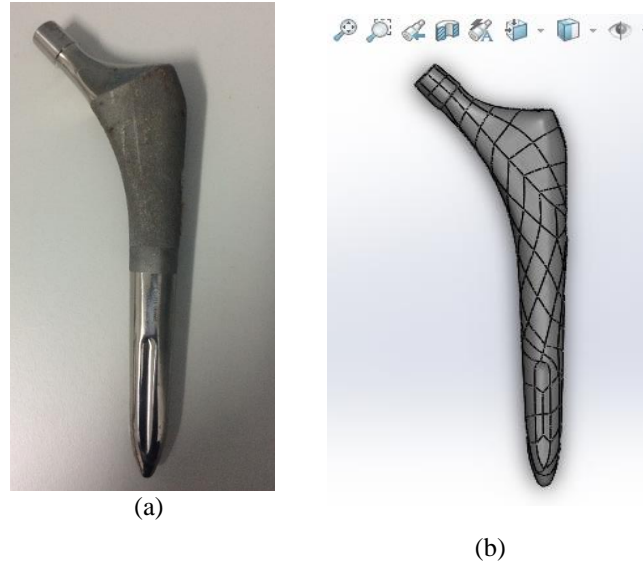
II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışma da analizler için sağ bacağı ait femur kemiği ve bu kemiğe uygun yerleşebilecek femoral stem ve femoral baş kullanıldı. Özel bir hastaneden alınan hastaya ait BT verileri ile kemik yapısının 3 boyutlu modeli için görüntü işleme programı olan MIMICS (Materialise's Interactive Medical Image Control System) kullanıldı. MIMICS, 2 boyutlu tomografi ve MRI görüntülerinin DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) formatında okuyarak 3 boyutlu hale getiren bir bilgisayar yazılımıdır (MIMICS 2017). Hastanın kalça eklem BT görüntülerinin MIMICS programına aktarılması hali şeklindeki gibidir (Şekil 1a). Kemik yapısının istenen CAD modeli için her görüntü katmanındaki boşluklara mask komutu ile doldurmalar yapıldı (Şekil 1b).



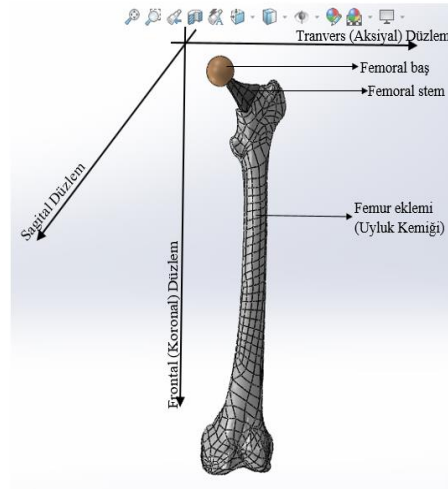
Şekil 1. MIMICS yazılımı ile Femur ekleminin 3 boyutlu modelinin oluşturulması

Hastanın revizyon operasyonu sonrası elde edilen 183 mm gövde uzunluğuna ve 40 mm boyun uzunluğuna sahip femoral stem, Sonlu Elemanlar Analizi sonucu elde edilecek verilerin karşılaştırılması için kullanıldı (Şekil 2a). Analizlerde kullanılacak katı modellerin doğruluğunu sağlamak amacıyla stem bileşeninin 3 boyutlu modeli DAVID tarayıcı ile 1° hassasiyetinde elde edildi (Şekil 2b). Bunun yanında analiz için kullanılacak femoral başın katı modeli 28 mm çapına göre oluşturuldu.



Şekil 2. (a) Revize operasyonu sonrası çıkarılan Femoral stem bileşeni ve
(b) CAD modeli

Elde edilen 3 boyutlu modeller, kalça protez cerrahi operasyonundaki uygulanan kesilere, boşluklara ve konuma göre birbir uygulanarak montajı gerçekleştirildi (Şekil 3). Tüm simülasyon modelinde çimentolu kalça protezi kullanılacağı için stem ile femur kemiği arasındaki boşluk sıfır olarak kabul edildi. Montajda kalça ekleminin altı ana hareketindeki yük ve kısıtlamaların uygulanması için 172 adet kas ünitesi kullanıldı. Kas birim yüklerinin kullanımı ile in vitro test koşullarının sağlanması ve buna göre analizlerin gerçekleştirilmesi daha doğru ve gerçekçi simülasyonu sağlamaktadır [16].



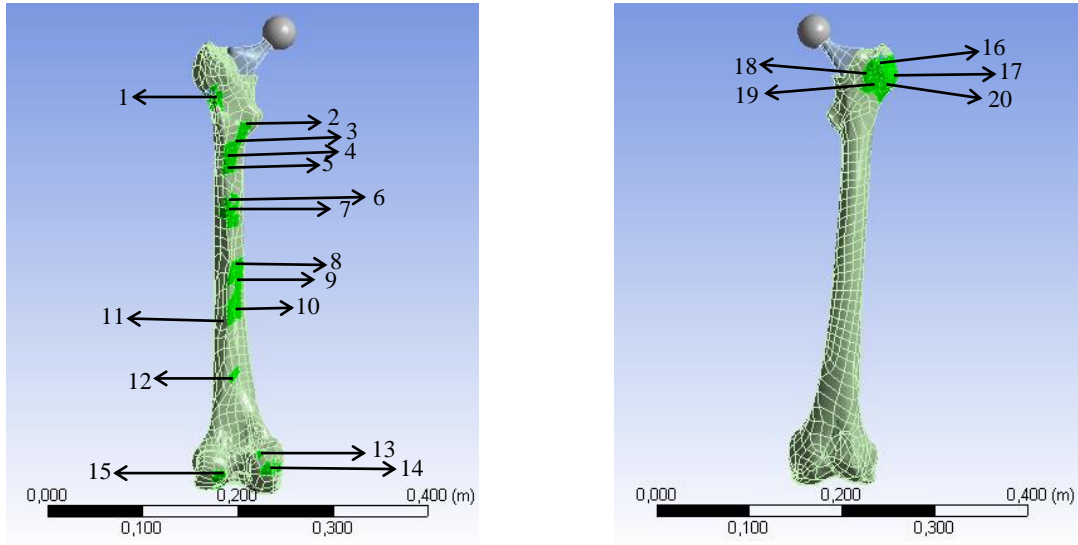
Şekil 3. Femur kemiğine protezlerin montajı

Sonlu Elemanlar Analizi için yapılan montaj ANSYS yazılımına aktarıldı ve montajdaki parçalara Tablo 1’de ifade edilen mekanik özellikler tanımlandı. Yükleme için kalça protezlerinin test edilmesi amacıyla belirlenen ISO 14242-1 Nolu standartta belirtilen maksimum 3000 N ve kas birim yüklemeleri kullanıldı. 3000 N’luk yükleme değeri femur kemiğinin uç kısmının sabit kabul edilmesi ile femur baş kısmından frontal düzlem ile aynı doğrultuda olmak şartı ile analizler gerçekleştirildi. Kas birim yükleme değerleri insan kalça eklemine göre konumlandırılarak yükleme sagittal düzleme dik olarak uygulandı [17]. Yüzeyler de oluşacak kayma gerilmesi, malzemelerin mekanik özelliklerinin maksimum değerlere göre değerlendirildi.

Tablo 1. Test edilen numunelerin mekanik özellikleri [18]

Biyomateriyaller	Elastik Modül (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Yorulma Dayanımı (MPa)	Poisson Oranı
Femur Kemiği (Yüksek Basınçta)	15.2	114	150c/90t	30-45	“0.6
CoCrMo	210-253	448-841	655t	207-950	0.3
Ti6Al4V	116	897-634	965t	620-689	0.342

Analizlerde kullanılacak kas birim yüklemeleri kas-iskelet simülasyon yöntemine göre tanımlandı ve bu tanımlama Şekil 4’de gösterildiği gibidir. Femur kemiğinde sabitleme ve yükleme olarak görev alan bu kaslar Tablo 2’de ifade edilmiştir.



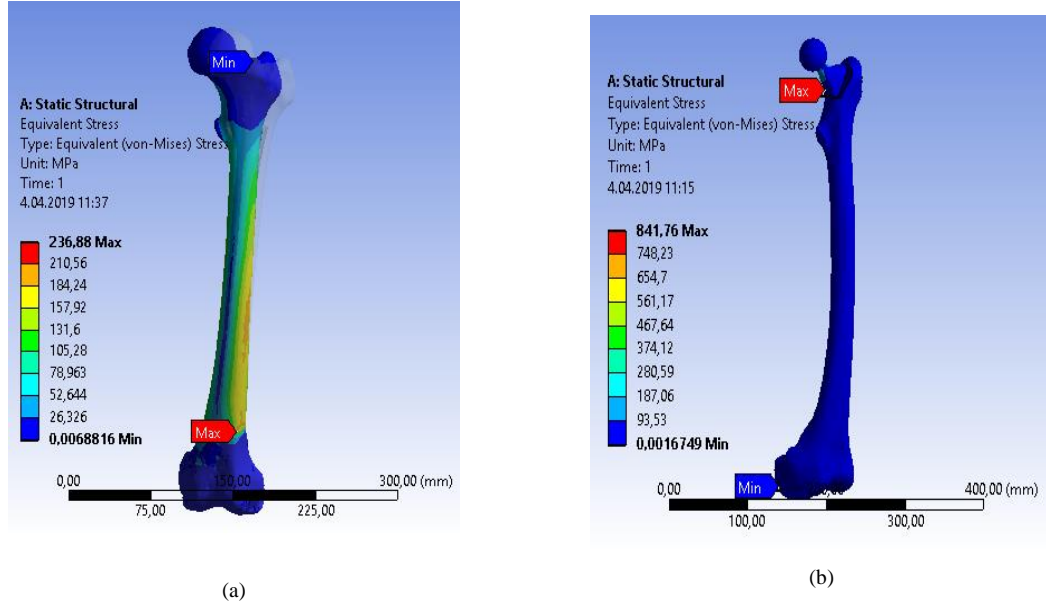
Şekil 4. Kas ve tendonların konum ve yük noktaları: (a) önden görünüm ve (b) arkadan görünüm.

Tablo 2. Analizde tanımlanan femur kemiğine etki eden kaslar [19]

Kaslar	Tanımlanan numaralar
Abductor brevis proximal	3
Adductor brevis distal	4,6
Adductor brevis mid	7
Adductor longus	8,9,10
Biceps femoris caput breve	11,12
Gastrenemius laterails	14
Gleteus medius anterior	16,17,18,19
Gleteus minimus mid	20
Ilicaus laterails	2
Diz kısıtlama reaksiyonu	15
Obturator externus inferior	1
Pectineus	5
Sartofuis Distal	13

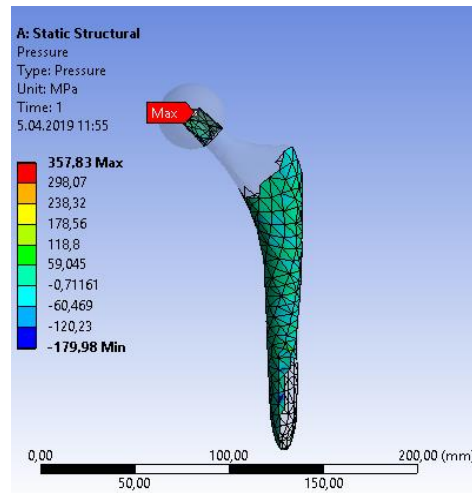
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Protezlerin kemikteki gerilme dağılımı üzerindeki etkisini tahmin etmek için sonlu elemanlar analizi uygulandı ve eşdeğer gerilmelerdeki farklılıklar değerlendirildi (Şekil 5). Femur kemiğinde maksimum 236,8 MPa eşdeğer gerilmesi ve bununla birlikte sünger benzeri yapısından dolayı yer değiştirmeler görüldü (Şekil 5a). Protez yerleştirilmiş femur kemiğinde ise oluşan maksimum 841,7 MPa eşdeğer gerilmesinin oluştuğu gözlemlendi (Şekil 5b).



Şekil 5. Femur kemiği ve protez yerleştirilmiş femur kemiğinin sonlu elemanlar analizi

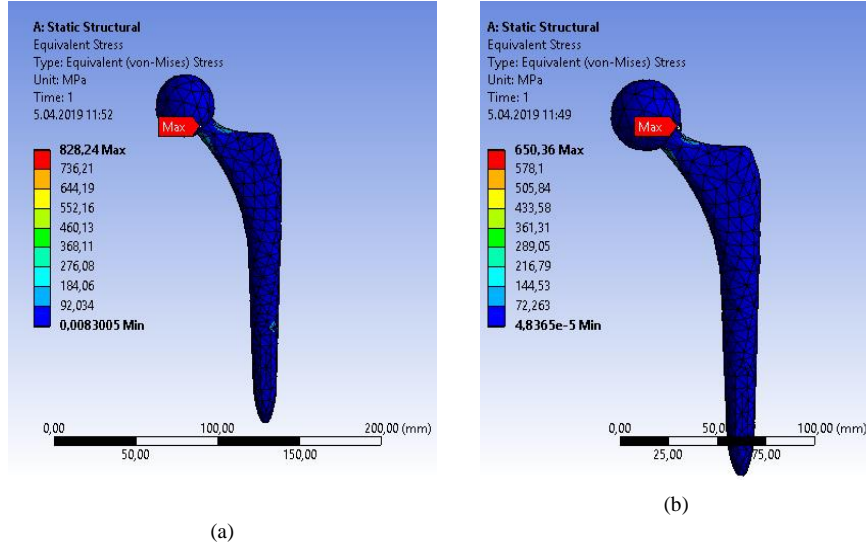
Yapılan analizlerde vücut ortamının birebir simüle edilmesi amacıyla tanımlanan kas birim değerleri ile stabilizeyi ve bacak dengesinin korunması sağlandı. Ayrıca bu kas birim yük değerlerinin kemiğe gelen yüklere karşı sönmüleyici bir etkiye sahip olduğu belirlendi. Bu değerlerin tanımlanması ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarında femur kemiğinde gerilme değerlerinin ve oluştuğu bölgelerin protezin yerleştirilmesi ile değişiklik gösterdiği Şekil 5’de görülmektedir. Bunun sebebi vücut konumu itibariyle dik gelen yükü, süngerimsi yapıda olan kemiğin yerine metal implantın taşımasıdır. Basınç dağılımında daha çok protezin kemiğe temas eden bölgelerinde ve femoral stem boynunda oluştuğu görüldü (Şekil 6).



Şekil 6. Kalça protezinde gerçekleşen temas basıncı

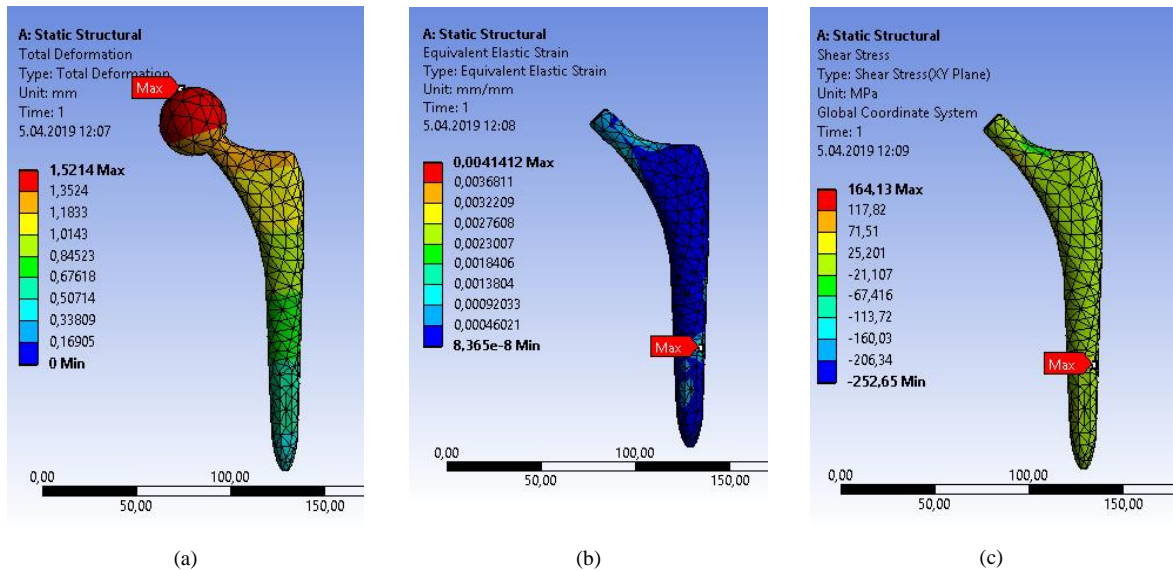
Femoral stem bileşenlerinde gerçekleşen gerilmelerin kas birim değerlerinin tanımlanmasıyla değiştiği belirlendi (Şekil 7). Kas birim yük değerlerinin tanımlanmadığı analiz sonucunda maksimum 828,24 MPa eşdeğer gerilme oluşurken tanımlanan analizde maksimum 650,36 MPa eşdeğer gerilme oluştuğu görüldü.

Oluşan bu maksimum gerilme değerleri ise her iki analiz sonucunda stem boyun kısmında birbirine göre yakın bölgelerde olduğu tespit edildi.



Şekil 7. (a) Kas birim yük değerlerinin tanımlanmadığı, (b) Kas birim yük değerlerinin tanımlandığı analiz sonuçları

Gerilme değerlerinin azalmasının yanında deformasyonun derinlik değerinde nispeten bir azalma görüldü (Şekil 8a). Daha çok femoral başta olduğu görülen deformasyon derinliği stem bileşeninin konik bölgesinde yoğunlaşmıştır. Şekil değiştirme değerleri boyun kısmına karşın femur kemiğine sabitlenen sap kısmında olduğu görüldü (Şekil 8b). Aynı bölgelerde kayma gerilmesinin de olduğu gözlemlendi (Şekil 8c).



Şekil 8. Kas birim yük değeri tanımlı analiz sonucunda femoral stem bileşeni

Femoral stemler bacak stabilitenin korunmasında ve vücut hareketlerinin gerçekleşmesinde oldukça önemli bir unsur olarak görev yapmaktadır. Gelen yüklemelere karşı basıncı ve gerilmelerin aktarılmasını ve oluşacak problemlerin engellenmesine yardımcı olmaktadır. Fakat malzeme özelliği itibarıyla ve kullanım süresine bağlı olarak maksimum gerilmelerin olduğu boyun kısmında aşınmalar gerçekleşmektedir. Revizyon operasyonlarının temel sebebi bu tür aşınma değerleridir ve daha çok femoral baş kısmından gerçekleştiği düşünülmektedir. Fakat literatürdeki çalışmalarda belirttiği üzere ve bu çalışmada yapılan analizler sonucunda stem bileşeninde oluşan deformasyon derinliği dikkate alınması gereken bir değerdedir. Bu tür aşınmaların engellenmesi için tasarım ve malzeme özelliklerinin incelenmesi için çalışmalar sağlanabilir. Ayrıca Sonlu Elemanlar Analizlerinin in vitro test koşullarının sağlanmasında önemli bir öncü olduğu görüldü. Kas-iskelet sisteminin tanıtımıyla gerçekleştirilecek analizler implant tasarımı ve malzeme analizleri için oldukça kısa süreli ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

IV. SONUÇLAR

Kalça protezlerinin aşınma değerlerini belirlemek için kas-iskelet simülasyonu uygulanarak Sonlu Elemanlar Analizleri gerçekleştirildi. Bu Sonlu Elemanlar Analizi uygulanarak elde edilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- Genel olarak kas birim yük değerlerinin uygulanması sonuçlarda kasların sönümleyici etkisi nedeniyle %35-45'lik farkların oluşturduğu görüldü. Bu etkilerin göz önünde bulundurulması ile sonuçların deneysel ortamlara daha yakın ve daha gerçekçi verilerin oluşmasına katkı sağlayacaktır.
- Ti6Al4V femoral stemlerinde gerilmeler, kas birim etkisinin uygulanma durumundaki iki durum için de boyun kısmında yoğunlaşmaktadır. Bu alandaki gerilmelerin ve deformasyon derinliğinin azaltılması ile statik bacak dengesinin koruma ve aşınmalar engellenebilir.
- Sonlu Elemanlar Analizi, karmaşık kalça implantlarının gerilme-deformasyon analizleri için güvenilir ve güçlü bir araç olarak kullanılabilir. Sayısal sonuçlar, cerrahi operasyonda uygulanan boşluklara benzer yapıların gerçekleştirilebileceği ve analizlerin in vitro ortamında sağlanabileceğine katkıda bulundu.

KAYNAKLAR

- [1] Bitar, D., & Parvizi, J. (2015). Biological response to prosthetic debris. *World journal of orthopedics*, 6(2), 172.
- [2] Chen, F. M., & Liu, X. (2016). Advancing biomaterials of human origin for tissue engineering. *Progress in polymer science*, 53, 86-168.
- [3] Heller, M. O., Bergmann, G., Kassi, J. P., Claes, L., Haas, N. P., & Duda, G. N. (2005). Determination of muscle loading at the hip joint for use in pre-clinical testing. *Journal of biomechanics*, 38(5), 1155-1163.
- [4] Hussenbocus S., Kosuge D., Solomon L. B., Howie D. W., & Oskouei R. H. (2015). Head-neck taper corrosion in hip arthroplasty. *BioMed research international*, 2015:758123.
- [5] Ramos A., Relvas C., Completo A., & Simões J. A. (2013). The formation of cracks at cement interfaces of different femoral stem designs. *European Orthopaedics and Traumatology*, 4(4), 205-215.
- [6] Kara, F., Aslantaş, K., & Cicek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network. *Applied Soft Computing*, 38, 64-74.
- [7] Colic, K., Sedmak, A., Grbovic, A., Tatic, U., Sedmak, S., & Djordjevic, B. (2016). Finite element modeling of hip implant static loading. *Procedia Engineering*, 149, 257-262.
- [8] Arabnejad, S., Johnston, B., Tanzer, M., Pasini, & D. (2017). Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress - shielding following total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*, 35(8), 1774-1783.

- [9] Brand, S., Bauer, M., Petri, M., Schrader, J., Maier, H. J., Krettek, C., & Hassel, T. (2016). Impact of intraprostatic drilling on the strength of the femoral stem in periprosthetic fractures: A finite element investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 230(7), 675-681.
- [10] Saravana, K. G., & George S. P. (2017). Optimization of custom cementless stem using finite element analysis and elastic modulus distribution for reducing stress-shielding effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 231(2), 149-159.
- [11] Ashkanfar, A., Langton, D. J., & Joyce, T. J. (2017). Does a micro-grooved trunnion stem surface finish improve fixation and reduce fretting wear at the taper junction of total hip replacements? A finite element evaluation. *Journal of Biomechanics*, 63, 47-54.
- [12] Westerman, A. P., Moor, A. R., Stone, M. H., & Stewart, T. D. (2018). Hip stem fatigue: The implications of increasing patient mass. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 232(5), 520-530.
- [13] Korhonen, R. K., Koistinen, A., Kontinen, Y. T., Santavirta, S. S., & Lappalainen, R. (2005). The effect of geometry and abduction angle on the stresses in cemented UHMWPE acetabular cups—finite element simulations and experimental tests. *Biomedical engineering online*, 4(1), 32.
- [14] Saikko, V. (2019). Effect of wear, acetabular cup inclination angle, load and serum degradation on the friction of a large diameter metal-on-metal hip prosthesis. *Clinical Biomechanics*.
- [15] Baxmann, M., Pfaff, A. M., Schilling, C., Grupp, T. M., & Morlock, M. M. (2017). Biomechanical Evaluation of the Fatigue Performance, the Taper Corrosion and the Metal Ion Release of a Dual Taper Hip Prosthesis under Physiological Environmental Conditions. *Biotribology*, 12, 1-7.
- [16] Windrich, M., Grimmer, M., Christ, O., Rinderknecht, S., & Beckerle, P. (2016). Active lower limb prosthetics: a systematic review of design issues and solutions. *Biomedical engineering online*, 15(3), 140.
- [17] ISO 14242-1: 2014, Implants for surgery - Wear of total hip-joint prostheses - Part 1: Loading and displacement parameters for wear-testing machines and corresponding environmental conditions for test, 2012.
- [18] Aherwar, A., Singh, A. K., & Patnaik, A., (2015). Current and future biocompatibility aspects of biomaterials for hip prosthesis. *AIMS Bioengineering*, 3(1), 23-43.
- [19] Sobotta, J., 2006. Atlas de anatomia humana (Vol. 2). Ed. Médica Panamericana.